



TUGAS AKHIR - TF 091381

ANALISIS PERFORMANSI MEMBRAN *HOLLOW FIBER* UNTUK MEMISAHKAN KARBONDIOKSIDA DENGAN METANA

HIROSHI AVOGUSTI
NRP 2412 105 022

Dosen Pembimbing :
TOTOK RUKI BIYANTO, Ph.D
Ir. YA'UMAR, MT

JURUSAN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2014



FINAL PROJECT - TF 091381

***PERFORMANCE ANALYSIS OF HOLLOW FIBER
MEMBRANE FOR CARBON DIOXIDE
SEPARATION WITH METHANE***

HIROSHI AVOGUSTI
NRP 2412 105 022

Advisor :
TOTOK RUKI BIYANTO, Ph.D
Ir. YA'UMAR, MT

*DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember of Institute Technology
Surabaya 2014*

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS PERFORMANSI MEMBRAN *HOLLOW FIBER* UNTUK MEMISAHKAN KARBONDIOKSIDA PADA METANA

TUGAS AKHIR

Oleh :

Hiroshi Avogusti
NRP : 2412 105 022

Surabaya, 6 Agustus 2014
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I,



Totok Ruki Biyanto, Ph.D
NIP. 19710702 199802 1 001

Pembimbing II,



Ir. Ya'umar, MT
NIP. 19540406 198103 1 003



Ketua Jurusan
Teknik Fisika FTI-ITS

Dr. Ir. Totok Soehartanto, DEA
NIP. 19650309 199002 1 001





**ANALISIS PERFORMANSI MEMBRAN HOLLOW FIBER
UNTUK MEMISAHKAN KARBONDIOKSIDA
PADA METANA**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Instrumentasi
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Oleh:
HIROSHI AVOGUSTI
NRP. 2412 105 022**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Totok Ruki Biyanto, Ph.D | 
.....(Pembimbing) |
| 2. Ir. Syamsul Arifin, MT | 
.....(Ketua Penguji) |
| 3. Ir. Ya'umar, MT | 
.....(Penguji I) |
| 4. Nur Lail Hamidah MSc | 
.....(Penguji II) |

**SURABAYA
Agustus, 2014**

ANALISIS PERFORMANSI MEMBRAN *HOLLOW FIBER* UNTUK MEMISAHKAN KARBONDIOKSIDA DENGAN METANA

Nama Mahasiswa : Hiroshi Avogusti
NRP : 2412.105.022
Jurusan : Teknik Fisika
Pembimbing : Totok Ruki Biyanto, Ph.D
Ir. Ya'umar, MT

Abstrak

Dalam kegiatan produksi migas, metana sangatlah penting peranannya, namun produksi ini juga dipengaruhi oleh faktor kontaminan atau pengotor yang ada di dalam meana, salah satunya yaitu karbondioksida. Pada penelitian ini membahas mengenai performansi membran hollow fiber, fungsinya untuk memisahkan metana dengan karbondioksida. Penelitian ini mengacu pada jenis aliran counter-current. Hasil dari sistem membran menghasilkan nilai metana yang besar, dikarenakan dipengaruhi oleh perubahan stage cut yang mengecil, berbanding terbalik dengan komposisi karbondioksida. Komposisi metana terbesar yaitu 0,980 mol dan terkecil yaitu 0,660 mol, sedangkan komposisi karbondioksida terbesar 0,137 mol dan terkecil yaitu 0,079 mol. Komposisi metana dan karbondioksida juga dipengaruhi oleh panjang fiber pada modul membran, dengan nilai terbesar yaitu 2 m. Nilai area membran juga berpengaruh untuk komposisi metana dan karbondioksida, dengan membuat simulasi optimasi dari beberapa contoh, didapatkan nilai untuk area membran yang ideal sebesar $32,59 \text{ cm}^2$ atau $0,032 \text{ m}^2$ pada kondisi tekanan feed sebesar 60 bar, nilai ini mempengaruhi faktor efisiensi membran. Didapatkan parameter yang sesuai untuk model matematis, dengan merujuk pada pengaruh tekanan feed, laju aliran feed, laju aliran permeate, laju aliran retentate, area membran, tekanan permeate, diameter dalam dan luar membran dan juga permeabilitas, sehingga dapat dilakukan sebuah performansi yang hasilnya adalah rekomendasi untuk menentukan parameter desain membran hollow fiber yang tepat.

Kata kunci: Performansi, Membran, Pemisahan karbondioksida-metana, Parameter desain, Optimasi.

PERFORMANCE ANALYSIS OF HOLLOW FIBER MEMBRANE TO SEPARATE CARBON DIOXIDE WITH METHANE

Name : Hiroshi Avogusti
NRP : 2412.105.022
Program Study : Engineering Physics
Advisor : Totok Ruki Biyanto, Ph.D
Ir. Ya'umar, MT

Abstrack

In oil and gas production activities. Methane is an important role, but the production is also influenced by contaminants or impurities that exist in the meaena, one of which is carbon dioxide. In this study discusses the performance of the hollow fiber membrane, functions to separate methane with carbon dioxide. This study refers to the type of counter-current flow. The results of the membrane system generates methane great value, because the cut is affected by changes in the shrinking stage, inversely proportional to the carbon dioxide composition. The composition of methane is 0.980 mol largest and the smallest is 0.660 mol, while the largest carbon composition and the smallest is 0.137 mol 0.079 mol. The composition of methane and carbon dioxide are also influenced by the length of the fiber membrane module, with the largest value that is 2 m. Also affect the value of the membrane area for the composition of methane and carbon dioxide, by making a s imulation optimization of several examples, the value obtained for the membrane area ideal for 32,59 cm² or 0,032 m² at the feed pressure for 60 bar, this value is a factor affecting the efficiency of the membrane. Obtained parameters corresponding to the mathematical model, with reference to the influence of the feed pressure, feed flow rate, permeate flow rate, retentate flow rate, membrane area, permeate pressure, the diameter of the inner and outer membra and permeability, so it can be a performance that the result is recommendation to determine the design parameters of hollow fiber membranes proper.

Key Word: Performance, Membrane, CH₄, -CO₂ separate, Parameter design, Optimization.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Segala puji syukur kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat, hidayat serta inayahnya dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Performansi Membran *Hollow Fiber* untuk Memisahkan Karbon dioksida dengan Metana”. Penulis telah banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Bapak Dr.Ir.Totok Soehartanto,DEA selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika ITS.
2. Bapak Totok Ruki Biyanto,Ph.D yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan ilmunya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
3. Bapak Ir.Ya’umar,MT yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan ilmunya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Ibu Dr.Aulia Siti Aisjiah,MT yang telah memberikan bimbingan dan ilmunya dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak dan Ibu dosen Teknik Fisika yang telah memberikan ilmu selama kuliah.
6. Bapak / Ibu seluruh karyawan Teknik Fisika yang telah membantu kelangsungan belajar di Jurusan Teknik Fisika.
7. Kedua orang tua penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan secara moril maupun materil setiap waktu.
8. Teman-teman angkatan LJ Teknik Fisika 2012 yang telah banyak membantu dalam mengerjakan Tugas Akhir ini.
9. Teman-teman SPAIN 09 D3 Teknik Instrumentasi yang telah memberikan motivasi dan dukungan.
10. Semua pihak yang telah mendukung dan memberikan doa yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa penulisan laporan Tugas Akhir ini tidaklah sempurna. Oleh karena itu sangat diharapkan kritik dan saran yang membangun dari semua pihak sehingga mencapai sesuatu yang lebih baik lagi. Penulis juga berharap semoga laporan ini dapat menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembacanya.

Surabaya, 6 Agustus 2014

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
 BAB I PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.6 Sistematika Laporan.....	3
 BAB II DASAR TEORI.....	 5
2.1 Pemisahan dengan membran	5
2.2 Membran <i>hollow fiber</i>	5
2.3 Model persamaan	8
2.4 Desain sistem membran	10
2.5 <i>One stage plant</i>	11
2.6 Tipe aliran pada sistem membran	13
2.6.1 <i>Counter current</i>	13
2.6.2 Persamaan differensial untuk <i>counter current</i>	15
 BAB III METODOLOGI	 17
3.1 Metodologi	17
3.2 Pemodelan matematis.....	19
3.3 Rumus menghitung <i>pressure drop</i>	20
3.4 Rumus variabel yang berdimensi	20

3.5 Rumus <i>stage cut</i>	21
3.6 Rumus komposisi <i>retentate</i>	21
3.7 Rumus komposisi <i>permeate</i>	22
3.8 Rumus area membran	22
3.9 Simulasi <i>GUI</i> pada <i>matlab</i> untuk optimasi	23
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	25
4.1 Perhitungan nilai <i>pressure drop</i>	25
4.2 Perhitungan komposisi <i>retentate</i> dan <i>permeate</i>	26
4.3 Perhitungan area membran.....	27
4.4 Hubungan laju aliran <i>feed</i> dengan karbondioksida.....	28
4.5 Hubungan laju aliran <i>feed</i> dengan metana.....	29
4.6 Perbandingan karbondioksida dengan tekanan <i>feed</i>	30
4.7 Perbandingan metana dengan tekanan <i>feed</i>	31
4.8 Hubungan tekanan <i>permeate</i> dengan karbondioksida	32
4.9 Hubungan tekanan <i>permeate</i> dengan metana	33
4.10 Hubungan panjang fiber dengan karbondioksida	34
4.11 Hubungan panjang fiber dengan metana	35
4.12 Optimasi untuk kondisi dan komposisi yang berbeda..	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	39
5.1 Kesimpulan.....	39
5.2 Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN A	
LAMPIRAN B	

DAFTAR GAMBAR

Gambar	2.1	Elemen-Elemen Membran <i>Hollow Fiber</i>	7
Gambar	2.2	Elemen Modul Membran <i>Hollow Fiber</i>	7
Gambar	2.3	Modul Membran <i>Hollow Fiber</i> Dengan <i>Feed</i> dan <i>Sheel Side</i>	8
Gambar	2.4	Bentuk Dari <i>Hollow Fiber</i>	8
Gambar	2.5	Teori Solusi-Difusi Untuk Penyebaran Gas Melalui Membran Berjenis Polimer	9
Gambar	2.6	Desain Sistem Kerja Membran <i>One Stage Plant</i> dan <i>Two Stage Plant</i>	11
Gambar	2.7	Skema Proses <i>One Stage Plant</i>	11
Gambar	2.8	Sistem Membran <i>Single Stage</i>	12
Gambar	2.9	Skema Diagram Dari <i>Counter-Current</i> Modul Membran <i>Hollow Fiber</i>	13
Gambar	2.10	Aliran <i>Counter-Current</i> Modul Membran <i>Hollow Fiber</i>	14
Gambar	2.11	Aliran <i>Co-Current</i> Modul Membran <i>Hollow Fiber</i>	14
Gambar	3.1	Diagram Alir Penelitian	17
Gambar	3.2	Skema Sederhana Aliran <i>Counter Current</i> Dari Modul <i>Hollow Fiber</i>	19
Gambar	3.3	Simulasi <i>GUI</i> Pada <i>Matlab</i>	23
Gambar	4.1	Grafik Hubungan Antara Laju Aliran <i>Feed</i> Dengan Komposisi Karbondioksida	28
Gambar	4.2	Grafik Hubungan Antara Laju Aliran <i>Feed</i> Dengan Komposisi Metana	29
Gambar	4.3	Grafik Perbandingan Nilai Komposisi Karbondioksida Dengan Tekanan <i>Feed</i>	30
Gambar	4.4	Grafik Perbandingan Nilai Komposisi Metana Dengan Tekanan <i>Feed</i>	31
Gambar	4.5	Grafik Hubungan Tekanan Pada Sisi <i>Permeate</i> Dengan Komposisi Karbondioksida	32
Gambar	4.6	Grafik Hubungan Tekanan Pada Sisi <i>Permeate</i> Dengan Komposisi Metana	33

Gambar 4.7	Grafik Hubungan Panjang Fiber Pada Modul Dengan Komposisi Karbondioksida	34
Gambar 4.8	Grafik Hubungan Panjang Fiber Pada Modul Dengan Komposisi Metana	35
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Tekanan <i>Feed</i> (0-50 bar) Dengan Area Membran	38
Gambar 4.10	Grafik Hubungan Tekanan <i>Feed</i> (50-100 bar) Dengan Area Membran	38

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1	Perhitungan Nilai <i>Pressure Drop</i>	25
Tabel 4.2	Komposisi <i>Retentate</i> dan <i>Permeate</i>	26
Tabel 4.3	Area Membran	27
Tabel 4.4	Parameter Desain Membran <i>Hollow Fiber</i>	36
Tabel 4.5	Hasil Area Membran Dengan Optimasi Simulasi <i>GUI</i>	37

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Satuan
T	Temperatur	K
P _f	Tekanan umpan	Pa
P _p	Tekanan <i>permeate</i>	Pa
F _o	Laju aliran <i>feed</i>	mol/s
l _e	Panjang fiber	m
N _f	<i>Number of fibers</i>	
D _i	Diameter dalam fiber	m
D _o	Diameter luar fiber	m
R _g	Ketetapan gas konstan	Pa.m ³ /mol.K
P _{ng}	Permeabilitas komponen	mol/m.Pa.s
D _{lm}	Log mean diameter fiber	m
μ	Viskositas campuran gas	Pa/s
V	Laju aliran <i>permeate</i>	mol/s
L	Laju aliran <i>retentate</i>	mol/s
π	Tekanan <i>Osmotic</i>	atm
Q _i	<i>Permeance of component</i>	mol/m ² .Pa.s
x	Fraksi mol gas pada sisi <i>shell</i>	-
y	Fraksi mol gas pada sisi <i>tube</i>	-
V'	Ukuran Laju aliran <i>permeate</i>	-

BAB I

PENDAHULAN

1.1 Latar Belakang

Penggunaan gas alam meningkat secara signifikan dalam kurun waktu belakangan ini karena gas alam telah menjadi kebutuhan industri maupun kebutuhan lainnya. Hal ini telah dijelaskan oleh ESDM RI dimana data energi mix menunjukkan presentase natural gas sebesar 26.5%, 26.57% pada tahun 2007 dan terus meningkat menjadi 30% pada tahun 2025^[1]. Dengan begitu, dibutuhkan proses untuk produksi gas yang dapat memenuhi kebutuhan di masa mendatang. Proses produksi ini juga meliputi proses pemisahan gas dengan kontaminan yang bersifat tidak menguntungkan dalam sistem pembakaran. Dimana metana sebagai bahan utama yang nilainya paling besar diantara kandungan yang lain. Kandungan dari gas alam berupa hydrogen, metana, ethylene, ethane, karbon monoksida dan karbondioksida^[2]. Pada penelitian ini yang lebih ditekankan adalah pemisahan karbondioksida dengan metana.

Karbondioksida adalah gas yang dapat mengganggu proses pembakaran. Karena , pada prinsip pembakaran ini terjadi jika ada bahan bakar, udara (oksigen) dan pemantik (api). Gas alam yang keluar dari sumur, baik yang ada di *offshore* atau *onshore* tidak selalu dalam keadaan yang bersih dan pasti terdapat kontaminan yang akan masuk dalam proses. Ada beberapa macam kontaminan misalnya yang berupa *liquid*, gas asam, karbondioksida, hidrogen sulfida, hidrokarbon tinggi, dan beberapa pengotor lainnya. Hal ini tergantung pada jenis sumur, tekanan pipa dan suhu lingkungan. Untuk itu maka diperlukan sebuah sistem yang dapat membuat gas yang akan dijual dalam keadaan bersih dari kandungan-kandungan seperti karbondioksida, H_2S atau jenis kandungan lainnya yang bersifat menghambat pembakaran.

Ada beberapa alternatif proses pemisahan karbondioksida dari gas alam diantaranya adalah dengan menggunakan *physical separation (membran dan cryogenic)*, absorpsi (*amine, hot*

potassium carbonate, fluor, selexol dan *rectisol*) dan adsorpsi^[3]. Untuk teknologi membran adalah yang sedang banyak dibahas dan digunakan belakangan ini, karena memiliki kelebihan diantaranya seperti biaya rendah/murah, kendalan tinggi, mudah dalam penggunaan, *on stream* tinggi saat beroperasi, dapat menghilangkan hidrokarbon tinggi, pemeliharaan rendah, tidak membutuhkan tempat besar, dan konsumsi energi rendah^[1]. Untuk jenis membran ini sendiri juga mempunyai beberapa macam, yaitu membran *hollow fiber*, membran *spiral wound* dan membran *skid*^[3].

Pada penelitian ini membahas membran *hollow fiber*, dengan demikian pembuatan model matematis untuk sistem membran *hollow fiber* sangat perlu, sebagai cara untuk membuat desain yang tepat dan menganalisa performansi membran *hollow fiber*, juga sebagai cara untuk menentukan model matematis yang sangat tepat. Kemudian model matematis tersebut diujikan pada *software* Matlab. Ada hal yang terpenting setelah membuat sebuah model matematis, yaitu menganalisa performansi membran *hollow fiber*, ini bertujuan untuk mendapatkan sebuah kinerja yang pas dengan menggunakan model matematis yang valid yang dibuat di *software* Matlab. Dimana didalamnya terdapat besaran variabel dari membran *hollow fiber*. Terdapat 5 besaran variabel penting pada membran *hollow fiber*, yaitu suhu (K), tekanan (bar), laju aliran (cm^3), permeabilitas (μ), area membran (m^2) dan tipe aliran. Maka dari itu diharapkan hasil dari tugas akhir ini adalah mendapatkan parameter yang terbaik untuk desain membran *hollow fiber*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana membuat pemodelan matematis performansi pada membran *hollow fiber*?
2. Bagaimana menganalisis performansi membran *hollow fiber*?
3. Bagaimana menentukan sebuah parameter optimal untuk membran *hollow fiber*?

1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Membuat suatu pemodelan matematis performansi pada membran *hollow fiber*
2. Melakukan analisis performansi dari membran *hollow fiber*.
3. Menentukan parameter yang optimal untuk membran *hollow fiber*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan-batasan masalah yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Data yang diambil berupa data sekunder.
2. Pemodelan matematis ini berdasar pada Hukum *Fick's*.
3. Menggunakan fungsi transfer dari empat variabel, yaitu *feed pressure*, area membran, *flowrate* dan permeabilitas.
4. Menganalisa performansi dari membran *hollow fiber*.

1.5 Sistematika Laporan

Adapun sistematika laporan pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika laporan.

BAB II DASAR TEORI

Berisi tentang teori-teori penunjang sistem membran *hollow fiber*.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini berisi tentang metode perhitungan yang digunakan dalam analisa dan cara pengolahan data.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Berisi tentang evaluasi hasil perhitungan serta pengaplikasian metode.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Berisi tentang hasil penelitian dan kesimpulan terhadap evaluasi yang dilakukan dan saran sebagai penunjang maupun pengembangan penelitian berikutnya.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Pemisahan dengan membran

Membran bekerja dengan cara perembesan pada komponen gas yang akan dipisahkan, sehingga komponen gas tersebut akan larut pada membran dan berdifusi melewati membran. Karbondioksida, hydrogen sulfida dan air memiliki tingkat perembesan yang lebih tinggi dibandingkan dengan metana dan senyawa hidrokarbon yang lebih berat. Karbondioksida, hydrogen sulfida dan air lebih cepat merembes ke membran dibandingkan senyawa hidrokarbon. Aliran yang mempunyai kandungan senyawa hidrokarbon akan menjadi senyawa residu dan aliran yang mempunyai kandungan karbondioksida akan diserap oleh membran^[4].

2.2 Membran *hollow fiber*

Membran digunakan untuk menghilangkan kadar karbondioksida pada metana. Menggunakan bahan jenis polimer, seperti *selulosa asetat*, *polyimides*, *poliamida*, *polisulfon*, *polikarbonat*, dan *polyetherimide*. Membran selulosa asetat pada awalnya dikembangkan untuk sistem *reverse osmosis* (penjernihan air) tapi sekarang membran digunakan untuk pemisahan karbondioksida pada metana. Membran berfungsi untuk memisahkan *fast gas* dari *slow gas*. Dimana *fast gas* ini adalah komposisi metana, sedangkan *slow gas* adalah komposisi karbondioksida. Sebuah membran yaitu bio-membran, yang mempunyai lembar lentur atau lapisan jaringan ikat yang bahannya terbuat dari serat hewani atau nabati, atau juga dari bahan buatan dan sintetis. Membran dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu *flat sheet* atau *hollow fiber*. *Flat sheet* biasanya digabungkan menjadi *spiral-wound element*, sedangkan *hollow fiber* digabungkan menjadi *bundle*, seperti *shell and tube heat exchanger*. *Hollow fiber elements* memiliki *packing density* yang tinggi. Plant yang menggunakan *hollow fiber* biasanya lebih kecil daripada yang menggunakan *spiral-wound*.

Membran *hollow fiber* adalah lembaran tipis mikro-pori dari bahan yang bisa menyerap bagian dari molekul di atasnya berdasarkan ukuran, bentuk, atau perubahan molekul, dan afinitas untuk molekul, sehingga secara selektif memisahkan material khusus dari campuran. Membran yang digunakan untuk penyisihan karbondioksida prinsip kerjanya tidak sama dengan filter. Pada *filter*, molekul kecil dipisahkan dari molekul yang lebih besar melalui medium yang berpori, sedangkan pada membran prinsip kerjanya yaitu difusi melalui *nonporous* membran. Mula mula karbondioksida larut (*dissolve*) ke dalam membran, kemudian berdifusi. Karena membran tidak berpori, pemisahan berlangsung bukan berdasarkan ukuran molekul, melainkan seberapa baik suatu senyawa terlarut dan berdifusi didalam membran. Gas yang dapat terlarut dan berdifusi dengan cepat di dalam membran disebut *fast gas*, misalnya karbondioksida, H_2 , HE , H_2S dan uap air yang disebut dengan *slow gas* yaitu seperti CO , N_2 , metana, etana dan hidrokarbon lain.

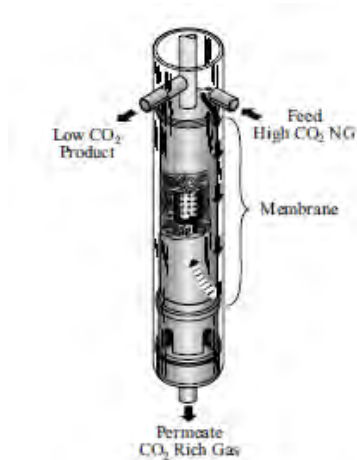
Terdapat beberapa parameter proses yang dapat disesuaikan untuk mengoptimalkan kinerja, tergantung pada kebutuhan dan aplikasi. Optimasi yang paling penting untuk sistem yang besar dimana perbaikannya kecil dapat membawa manfaat yang besar. Beberapa kelebihan dari membran *hollow fiber*^[2], adalah :

- Biaya rendah/murah.
- Keandalan tinggi.
- *On-stream* tinggi ketika beroperasi.
- Mudah dalam penggunaan.
- Dapat menghilangkan hidrokarbon tinggi.
- Pemeliharaan rendah.
- Konsumsi energi rendah.

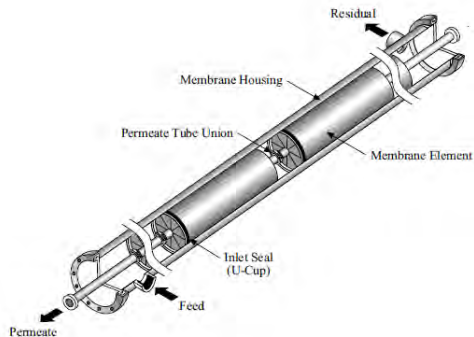
Adapun kekurangan dari membran *hollow fiber* sebagai berikut^[2]

- Menambah selektivitas tapi mengurangi permeabilitas.

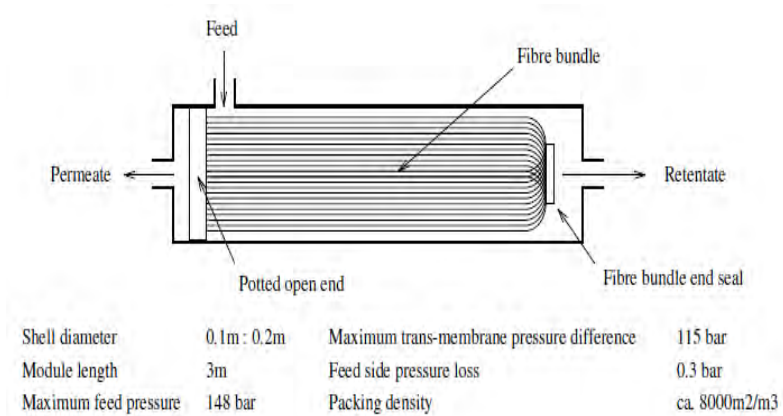
- Biaya investasinya besar jika digunakan dalam waktu yang lama.
- Sensitif terhadap perubahan kondisi umpan.
- *Pressure drop* besar, bisa mencapai 5 kg/cm^2 .



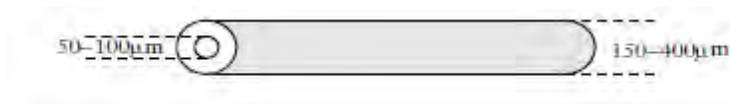
Gambar 2.1 Elemen Elemen Membran *Hollow Fiber*^[2]



Gambar 2.2 Elemen Modul Membran *Hollow Fiber*^[2]



Gambar 2.3 Modul Membran *Hollow Fiber* Dengan *Feed* dan *Shell Side*^[5]



Gambar 2.4 Bentuk Dari *Hollow Fiber*^[5]

2.3 Model Persamaan

Model persamaan untuk membran *hollow fiber* dijelaskan oleh hukum *fick's*. Hukum *fick's* menjelaskan penyebaran gas melalui membran yang berjenis polimer dan ekuilibrium yang mengacu pada fenomena difusi pada gas dari lapisan selektif^[3].

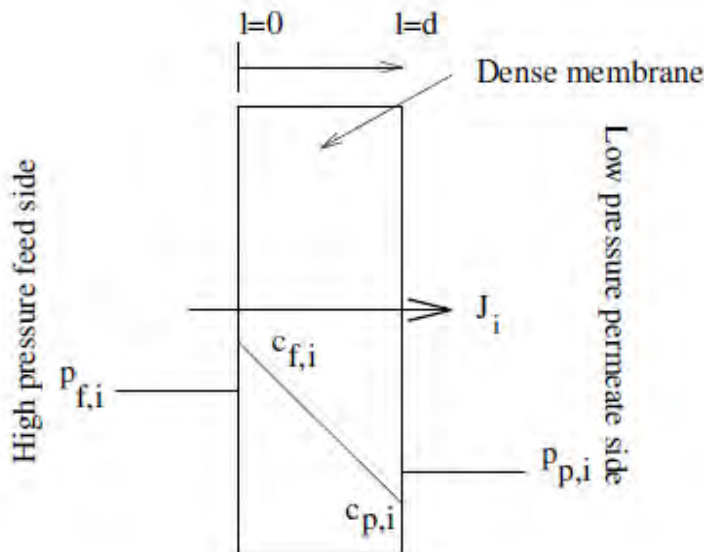
$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dl} \quad (2.1)$$

Dimana :

J_i : difusi komponen (i), [mol/(m².s)]
 D_i : koefisien difusi komponen (i), [m²/s]

dC/dl : gradien konsentrasi penyebaran gas dalam membran
(mol/m^3)

Proses difusi yang merupakan langkah bertahap yang dijelaskan oleh hukum fick's pada persamaan (2.1), dimana dC/dl yaitu gradien konsentrasi yang melintasi membran.



Gambar 2.5 Teori Solusi-Difusi Untuk Penyebaran Gas Melalui Membran Berjenis Polimer^[8].

Pada gambar 2.5 menjelaskan, sisi tekanan rendah dari membran untuk bisa melarutkan gas, solusi ini dijelaskan oleh hukum henry pada persamaan (2.2), yang menjelaskan kelarutan gas bertekanan rendah dalam polimer.

$$J_i = Q_i (P_F x_i - P_P y_i) \quad (2.2)$$

Dimana :

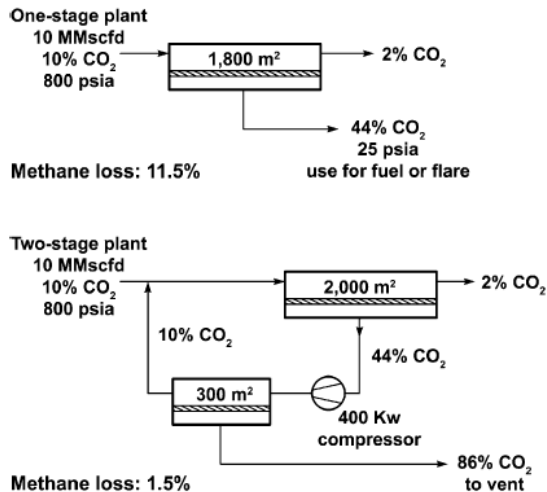
- Q_i : penyebaran komponen (i), [mol/(m².Pa.s)]
 P_F : tekanan *feed* (Pa)
 P_P : tekanan *permeate* (Pa)

2.4 Desain sistem membran

Desain membran untuk pemisahan karbon dioksida akan bergantung pada beberapa faktor, yaitu^[6] :

- Membran bersifat selektivitas dan perembesan dalam memisahkan karbon dioksida.
- Konsentrasi karbon dioksida (jumlah) pada gas yang akan diproses.
- Lokasi dari plant itu sendiri (*offshore* atau *onshore*).

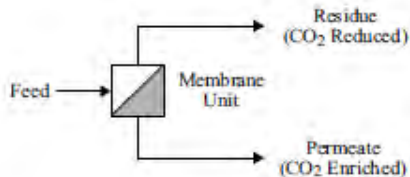
Gambar blok diagram dibawah ini yaitu menjelaskan tipikal dari sistem membran pada umumnya, keduanya dapat memisahkan karbon dioksida dengan konsentrasi karbon dioksida yang rendah. Sistem pada gambar 2.6 menjelaskan sistem aliran membran yang keduanya di desain untuk menghilangkan 10 *million scfd* gas dengan kandungan karbondioksida sebesar 10%. *One stage plant* mempunyai desain sistem yang sederhana, tidak ada peralatan yang memutar proses (*cycle*), hanya membutuhkan sedikit perawatan dan digunakan pada aliran gas yang sangat kecil. Sedangkan untuk *two stage plant* mempunyai peralatan yang dapat memutar proses dan plant ini lebih mahal harganya dibandingkan dengan *one stage plant*, karena membutuhkan kompresor yang besar untuk memampatkan gas pada *permeate*. Bagaimanapun, sistem ini lebih unggul karena mempunyai kelebihan yaitu kehilangan metana (*methane loss*) dapat berkurang sampai nilai terendah dibandingkan dengan *one stage plant*^[6].



Gambar 2.6 Desain Sistem Kerja Membran *One Stage Plant* dan *Two Stage Plant*^[6].

2.5 One stage plant

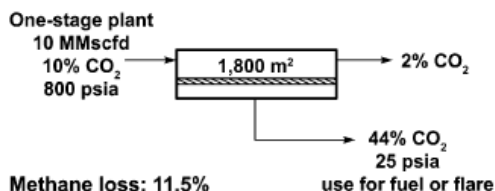
One-Stage Flow Scheme



Gambar 2.7 Skema Proses *One Stage Plant*^[6]

Skema pengolahan membran sederhana adalah skema aliran *one stage*. Sebuah gas umpan (*feed gas*) dipisahkan menjadi aliran serapan yang mengandung karbondioksida dan sisa aliran yang juga mengandung banyak hidrokarbon. Dalam aplikasi penghilangan karbondioksida, sejumlah besar hidrokarbon diserap oleh membran. Bagian hidrokarbon yang

telah diserap oleh tahap pertama (*single stage*) biasanya diambil dari modul membran pertama, dimana gas yang mengandung karbon dioksida tinggi akan terserap dan hidrokarbon yang rendah juga akan ikut terserap. Yang dapat diserap adalah karbondioksida yang telah didaur ulang pada tahap pertama yang tekanannya rendah dan harus ditahan sebelum dapat dikombinasikan dengan *feed gas*^[6].



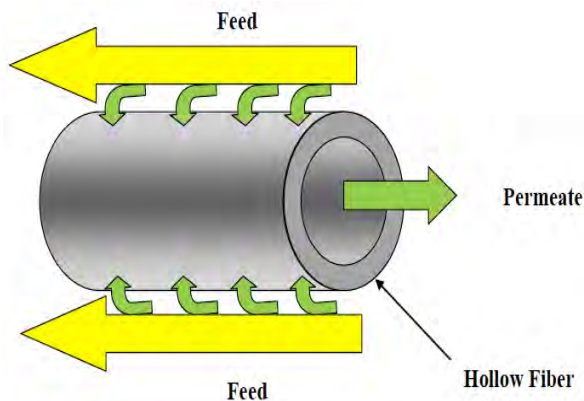
Gambar 2.8 Sistem Membran *Single Stage*^[6]

Pada gambar dari sistem membran *single stage* diatas, menjelaskan bahwa karbon dioksida dapat dihilangkan dari gas alam dan mempunyai kemampuan untuk membuat metana tidak mengalami *losses* yang banyak (ditunjukkan pada gambar 2.5). *Plant* ini dirancang untuk menghilangkan 10 juta scfd gas yang mengandung 10% karbondioksida. Pada *one stage plant* yang sederhana ini tidak ada peralatan yang bersifat berputar, hanya memerlukan perawatan yang sedikit, *flow gas* sangat kecil. Pada *plant* tersebut, metana akan hilang sekitar 10%-15%, jika gas ini tidak ada penggunaan untuk bahan bakar, setidaknya harus menyala, karena akan berdampak pada kerugian pendapatan yang signifikan. Untuk sumur gas yang menghasilkan >1 MMscfd dengan biaya yang rendah untuk satu tahap unit membran. Aliran gas alam meningkat dalam ukuran dan kapasitas, hilangnya metana dari sistem *one stage* dan kerugian yang dihasilkan membuat dampak yang besar pada pendapatan perusahaan^[6].

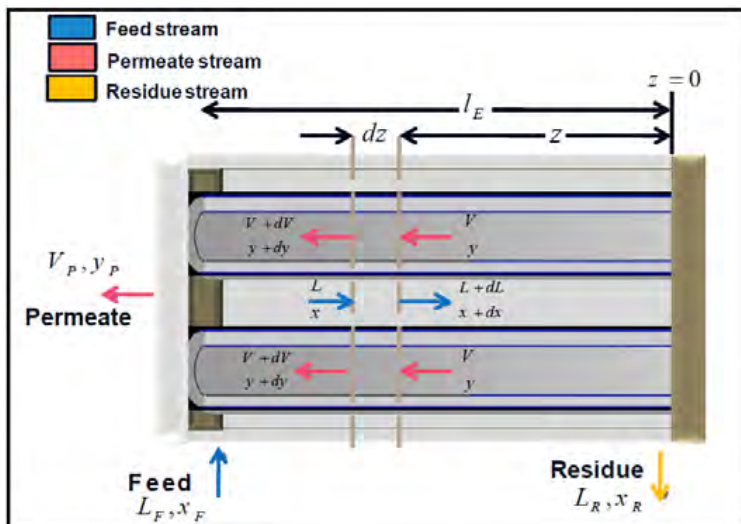
2.6 Tipe aliran pada sistem membran

2.6.1 Counter Current^[3]

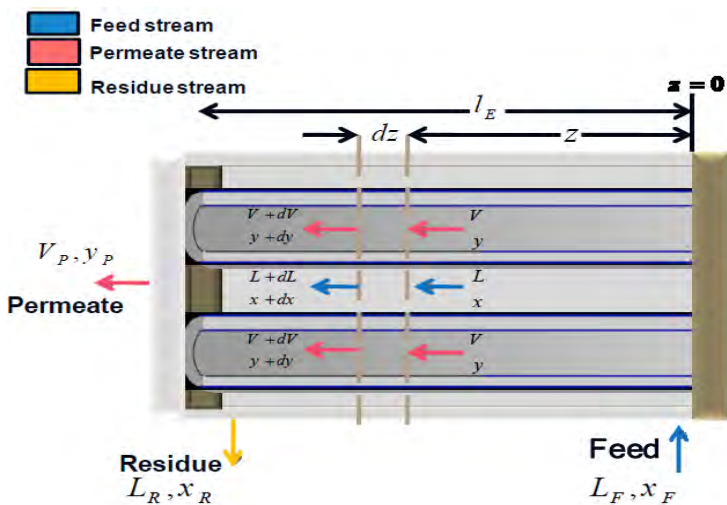
Pada proses pemisahan gas, ada beberapa macam pola aliran dari modul membran, yaitu *counter-current* dan *co-current*. Pola aliran tersebut yang paling sering digunakan di industri gas. Pola aliran *counter current* menggambarkan aliran dalam modul *hollow fiber*. *Counter-current* juga bisa digunakan untuk pemisahan hidrogen. Transportasi multikomponen melalui membran menghasilkan nilai material yang juga diikuti dengan penurunan tekanan. Model yang dihasilkan dalam bentuk diferensial dapat diselesaikan dengan berbagai algoritma komputasi seperti solusi perkiraan, elemen hingga dan metode kolokasi. Teknik yang terakhir digunakan dalam penelitian ini mengubah persamaan diferensial batas nilai ke dalam satu set persamaan aljabar yang bisa diselesaikan dengan prosedur *newton*^[7]. Tipe aliran *counter current* memiliki kelebihan dibandingkan tipe aliran yang lain seperti *co-current*. *Counter current* lebih efisien untuk pemisahan karbondioksida/metana pada semua kondisi, dimana laju aliran umpan, tekanan umpan dan panjang modul *fiber* berpengaruh pada produksi yang dihasilkan^[8].



Gambar 2.9 Skema Diagram Dari *Counter-Current* Modul Membran *Hollow Fiber*^[3]



Gambar 2.10 Aliran Counter-Current Modul Membran Hollow Fiber^[3]



Gambar 2.11 Aliran Co-Current Modul Membran Hollow Fiber^[3]

2.6.2 Persamaan differensial untuk aliran *counter current* pada modul membran *hollow fiber* dengan sistem pemisahan dua komponen

$$\frac{dx}{dz'} = K1 \frac{\alpha(1-x)(x-\gamma y) - x[(1-x) - \gamma(1-y)]}{(1-V')} \quad (2.3)$$

$$\frac{dx}{dz'} = K1 \frac{[\alpha(1-x)(x-\gamma y) - y[(1-x) - \gamma(1-y)]]}{V'} \quad (2.4)$$

$$\frac{dV'}{dz'} = \frac{dL'}{dz'} = K1 \frac{[\alpha(x-\gamma y) + (1-x) - \gamma(1-y)]}{V'} \quad (2.5)$$

$$\frac{d\gamma}{dz'} = -K2 \frac{V'}{\gamma} \quad (2.6)$$

Nilai K1 dan K2 diatas diperoleh dari :

$$K1 = \frac{\pi D_{lm} l_e N_f P_f P_{ng}}{qf} \quad (2.7)$$

$$K2 = \frac{128 \mu T R g l_e qf}{N_f \pi D_i^4 P f^2} \quad (2.8)$$

Dimana :

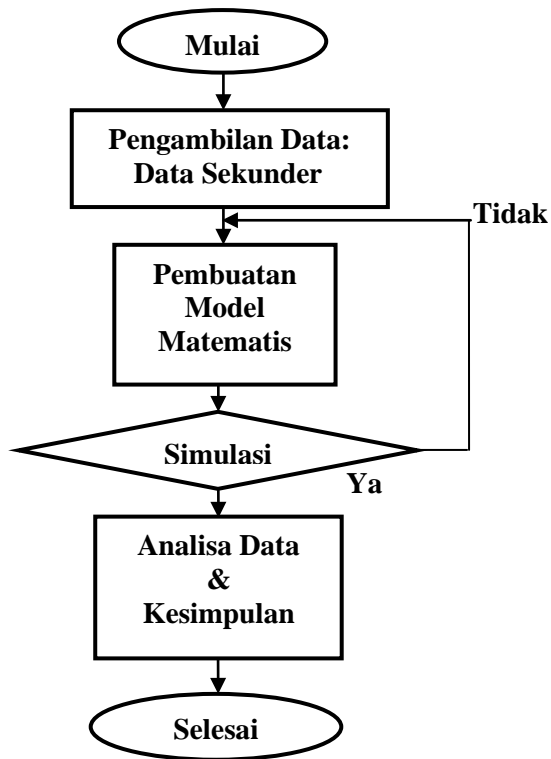
- α = selektivitas komponen
- x = fraksi mol gas cepat pada sisi shell membran
- γ = perbandingan tekanan permeate pada tekanan feed
- y = fraksi mol gas cepat pada sisi tube membran
- V' = laju aliran permeate yang berdimensi
- π = osmotic pressure (atm)
- D_{lm} = log mean diameter (m)

l_e	= panjang fiber pada modul membran (m)
N_f	= nomer fiber
P_f	= tekanan feed (bar)
P_{ng}	= permeabilitas komponen [mol/(m.Pa.s)]
Q_f	= laju aliran feed (mol/s)
T	= temperatur (K)
R_g	= gas konstan umum [Pa.m ³ /(mol.K)]
D_i	= diameter dalam fiber (m)

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metodologi

Adapun metodologi yang di gunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada *flowchart* di bawah ini :



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

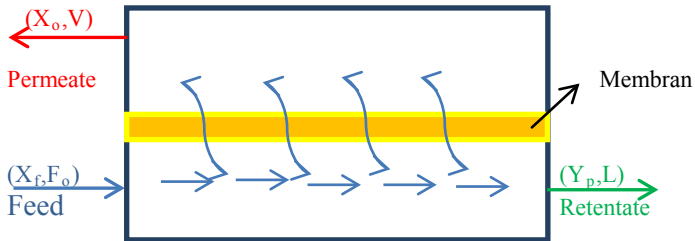
Keterangan *Flowchart* Penelitian :

1. Pengambilan data sekunder, berupa data parameter. Tekanan *feed* (bar), komposisi *feed* (mol), laju aliran *feed* (mol/s), laju aliran *permeate* (mol/s), laju aliran *retentate* (mol/s) (tekanan *permeate* (bar), temperatur (K), panjang fiber (m), ketebalan membran (μm), jumlah fiber, diameter dalam fiber (m) dan diameter luar fiber (m).
2. Pembuatan model matematis, yaitu menghitung nilai *pressure drop*, persamaan differensial jenis aliran *counter current* untuk dua sistem campuran komponen, *stage cut*, komposisi karbondioksida, komposisi metana dan area membran. Dengan memasukkan parameter tekanan *feed*, komposisi *feed*, temperatur, laju aliran *permeate*, laju aliran *retentate*, *stage cut*, nilai gas konstan, panjang fiber, tekanan *permeate*, viskositas, gamma, alfa, permeabilitas metana dan karbondioksida.
3. Simulasi yaitu mensimulasikan hasil dari perhitungan kedalam *software matlab* dan kemudian mencari paramater yang berpengaruh, seperti tekanan *feed*, laju aliran, panjang fiber, diameter dalam dan luar fiber, area membran. Jika nilai komposisi metana, karbondioksida dan area membran tidak mencapai target maka akan kembali ke langkah pembuatan model matematis dan berikut perhitungannya.
4. Analisa data dan pembahasan, yaitu menganalisa hasil dari perhitungan pemodelan matematis, kemudian dilakukan pembahasan untuk

mengetahui parameter yang paling sesuai sebagai performansi membran *hollow fiber*.

3.2 Pemodelan matematis

Tujuan dari pemodelan rumus ini adalah mengembangkan model matematis yang sederhana dan tepat untuk desain sistem membran. Pada bagian ini menjelaskan derivasi dari model dan asumsi yang mendasarinya. Pada gambar dibawah ini (gambar 3.1) menunjukkan bahwa modul *hollow fiber* disederhanakan dengan satu *fiber* pada kondisi *counter current* beroperasi. *Feed stream* mengalir di sepanjang bagian luar *hollow fiber*. Gas terserap melalui dinding membran dan masuk kedalam *hollow fiber* dimana aliran tersebut mengalir berlawanan dengan *feed stream*^[4].



Gambar 3.2 Skema Sederhana Aliran *Counter Current* Dari Modul *Hollow Fiber*

Dimana :

F_o : Laju aliran *feed* (mol/s)

X_f : Fraksi molar *feed* (mol)

V : Laju aliran *permeate* (mol/s)

Y_p : Fraksi molar *retentate* (mol)

L : Laju aliran *retentate* (mol/s)

X_o : Fraksi molar *permeate* (mol)

3.3 Rumus menghitung *pressure drop*

Rumus ini adalah untuk menghitung nilai *pressure drop* pada sisi *permeate*^[3]. :

$$\frac{dP_p}{dz} = - \frac{128 \mu Q}{N_f \pi D_i^4} \quad (3.1)$$

Dimana :

μ : Viskositas campuran gas (Pa/s)

Q : Volume laju aliran di sisi *permeate* (m³/s)

N_f : Nomer Fiber

π : Tekanan *osmotic* (atm), $\pi = \frac{n}{V_m} RT$

D_i : Diameter fiber bagian dalam (m)

Nilai Q pada persamaan 3.1 diatas adalah nilai volumetrik laju aliran pada sisi *permeate*^[3] :

$$Q = \frac{TVR_g}{P_p} \quad (3.2)$$

Dimana :

T : Temperatur (K)

V : Laju aliran *permeate* (mol/s)

R_g : Gas konstan umum [Pa.m³/(mol.K)]

P_p : Tekanan *permeate* (bar)

3.4 Rumus variabel yang berdimensi

Rumus dibawah ini yaitu untuk menghitung variabel yang berdimensi^[3]. Rumus ini kemudian dimasukkan kedalam persamaan (2.3),(2.4),(2.5) dan (2.6).

$$z' = \frac{z}{l_s}; L' = \frac{L}{F_o}; V' = \frac{V}{F_o}; Y = \frac{P_p}{P_f}; \alpha i = \frac{Q_i}{Q_n} \quad (3.3)$$

Dimana :

z' = faktor difusi cepat yang berdimensi

z = koordinat difusi pada membran (m)

l_e = panjang fiber (m)

L' = laju aliran *retentate* yang berdimensi

V' = laju aliran *permeate* yang berdimensi

V = laju aliran *permeate* (mol/s)

F_o = laju aliran *feed* (mol/s)

γ = rasio tekanan *permeate* dengan tekanan *feed*

P_p = tekanan *permeate* (bar)

P_f = tekanan *feed* (bar)

α_i = selektivitas komponen

Q_i = faktor penyerapan komponen [mol/(m².Pa.s)]

3.5 Rumus *stage cut*

Stage cut adalah rasio laju alir *permeate* selama laju aliran *feed*^[4].

$$\theta = \frac{V}{F_o} \quad (3.4)$$

Dimana :

V = Laju aliran *permeate* (mol/s)

F_o = Laju aliran *feed* (mol/s)

3.6 Rumus komposisi *retentate*

Komposisi *retentate* adalah hasil dari gas yang tidak terserap atau diteruskan. Karena *retentate* hasil dari gas karbondioksida yang tidak terserap oleh membran dan diteruskan ke sisi *retentate* dan mempunyai kandungan karbondioksida yang besar. :

$$y_p = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1} \quad (3.5)$$

Dimana :

y_p = komposisi *retentate* (mol)

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \theta + \frac{p_l}{p_h} - \frac{p_l}{p_h} \theta - \alpha' \theta - \alpha' \frac{p_l}{p_h} + \alpha' \frac{p_l}{p_h} \theta \\
 b_1 &= 1 - \theta - x_f - \frac{p_l}{p_h} + \frac{p_l}{p_h} \theta + \alpha' \theta + \alpha' \frac{p_l}{p_h} - \alpha' \frac{p_l}{p_h} \theta + \alpha' x_f \\
 c_1 &= \alpha' \frac{p_f}{p_p} x_o
 \end{aligned}$$

3.7 Rumus komposisi *permeate*

Komposisi *permeate* adalah hasil dari penyerapan membran, komposisi *permeate* ini berupa gas metana yang terlepas dari gas karbondioksida^[4].

Berikut perhitungan untuk mengetahui nilai dari komposisi *permeate*^[4]:

$$X_o = \frac{x_f - \theta y_p}{1 - \theta} \quad (3.6)$$

Dimana :

X_o = komposisi *permeate* (mol)

X_f = komposisi *feed* (mol)

θ = *stage cut*, perbandingan laju aliran *permeate* dengan laju aliran *feed*. $\theta = \frac{V_i}{F_o}$

Y_p = komposisi *retentate* (mol)

3.8 Rumus area membran

Perhitungan ini untuk mengetahui area membran (luasan). Dimana area membran adalah faktor yang berpengaruh untuk menentukan parameter desain spesifikasi membran *hollow fiber* yang ideal^[4].

$$Am = \frac{\theta F_o y_p}{\left(\frac{P_1 A}{t}\right)(p_h x_o - p_l y_p)} \quad (3.7)$$

Dimana :

A_m = area membran (m²)

θ = *stage cut*, perbandingan laju aliran *permeate* dengan laju aliran *feed* $\theta = \frac{V}{F_o}$

F_o = laju aliran *feed* mol/s

Y_p = komposisi *retentate* (mol)

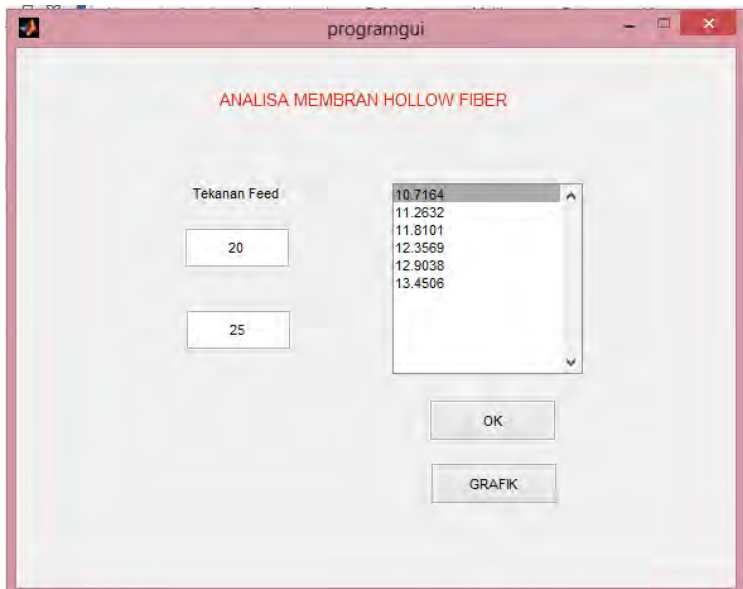
P_f = total tekanan *feed* (bar)

X_o = komposisi *permeate* (mol)

P_p = total tekanan *permeate* (bar)

Y_p = komposisi *permeate* (mol)

3.9 Simulasi *GUI* pada *matlab* untuk optimasi



Gambar 3.3 Simulasi *GUI* Pada *Matlab*

Pada simulasi ini yaitu menggunakan *GUI* pada *matlab* untuk membuat optimasi pada membran *hollow fiber*. Simulasi ini bertujuan untuk mencari nilai area membran yang paling kecil dengan memasukkan *parameter input* didalamnya. Untuk membuat simulasi

optimasi menggunakan GUI matlab yaitu dengan menambahkan rumus (3.10) dan (3.13) pada *coding* programnya. Simulasi optimasi membran *hollow fiber* ini menggunakan sistem *looping*, yaitu ketika memasukkan nilai tekanan *feed* akan muncul hasil dari nilai area membran. Nilai tekanan *feed* diasumsikan sebagai variabel yang diubah-ubah besarannya, dan variabel *input* yang lain diasumsikan konstan. Hasil dari area membran ini dicari nilai yang paling kecil, karena tujuan optimasi ini mendapatkan efisiensi dari segi ukuran dan performansinya, juga penggunaan energi yang rendah ketika ukuran membran tersebut kecil. Pada simulasi optimasi ini juga dapat menampilkan grafik hubungan antara tekanan *feed* dengan area membran.

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pembahasan pada penelitian ini menganalisa hubungan laju aliran *feed*, tekanan *feed*, nilai *retentate*, nilai *permeate*, panjang membran dan area membran. Studi ini mengambil nilai nilai eksperimental dari Shamsabadi^[3] dan Geankoplis^[4]. Nilai karbondioksida dan metana bergantung pada laju aliran *feed*, tekanan *feed*, laju aliran *permeate* dan laju aliran *retentate*. Nilai *stage cut* berpengaruh pada nilai komposisi karbondioksida dan metana, nilai area membran bergantung pada besarnya nilai karbondioksida dan metana.

4.1 Perhitungan nilai *pressure drop*

Perhitungan ini *pressure drop* adalah untuk menghitung nilai *pressure drop* pada sisi *permeate* :

Tabel 4.1 Perhitungan Nilai *Pressure Drop*

μ (Pa/s)	Q (m ³ /s)	N_f	π (atm)	D_i^4 (μm)	d_{pp}
9.5	2,41x10 ⁶	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-14,13
9.5	3,36x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-19,78
9.5	3,77x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-22,20
9.5	3,93x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-23,11
9.5	3,978x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-23,37
9.5	3,973x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-23,35
9.5	4,51x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-26,50
9.5	4,41x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-25,93
9.5	4,32x10	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-25,40
9.5	4244471	3x10 ⁶	1.79x10 ¹²	8x10 ⁻¹⁵	-24,94

Pada tabel perhitungan diatas menggunakan persamaan (3.1), nilai *pressure drop* berubah mengikuti nilai dari Q . Q adalah laju aliran volumetrik pada sisi *permeate*^[3], nilai d_{pp} semakin turun karena laju aliran volumetrik pada *permeate* berubah fluktuatif, hal ini dikarenakan ada hubungannya dengan laju aliran dari *feed* dan juga laju aliran dari *permeate* itu sendiri.

4.2 Perhitungan komposisi *retentate* dan *permeate*

Pada perhitungan komposisi *retentate* dan *permeate* ini adalah untuk mengetahui nilai komposisi dari gas yang dihasilkan oleh kedua sisi membrane. *Permeate* yaitu hasil gas metana yang menembus membran karena melalui proses difusi, sedangkan nilai komposisi *retentate* adalah hasil gas karbondioksida yang tidak menembus ke membran, dan cenderung diteruskan. Perhitungan komposisi *permeate* ini didapatkan dari persamaan (3.4) dan perhitungan *retentate* didapatkan dari persamaan (3.5). Dibawah ini tabel komposisi *permeate* dan *retentate*.

Tabel 4.2 Komposisi *Retentate* dan *Permeate*

θ	α'	a_1	b_1	c_1	y_p (mol)	x_f (mol)	x_o (mol)
0.141	4.367	0.090	3.825	-2.982	0.137	0.683	0.660
0.131	4.367	0.079	3.989	-3.240	0.126	0.742	0.723
0.118	4.367	0.065	4.106	-3.445	0.108	0.789	0.774
0.113	4.367	0.060	4.167	-3.546	0.101	0.812	0.799
0.110	4.367	0.056	4.220	-3.629	0.096	0.831	0.819
0.108	4.367	0.055	4.295	-3.734	0.094	0.855	0.844
0.106	4.367	0.053	4.447	-3.939	0.092	0.902	0.891
0.105	4.367	0.051	4.523	-4.044	0.090	0.926	0.916
0.102	4.367	0.048	4.693	-4.275	0.087	0.979	0.969
0.098	4.367	0.044	4.712	-4.319	0.079	0.989	0.980

Nilai y_p adalah komposisi *retentate* dan x_o adalah komposisi *permeate*. Perubahan nilai komposisi *retentate*, nilai a_1, b_1 dan c_1 adalah variabel komponen dari komposisi *retentate*, nilai y_p terbesar adalah 0,137 mol. Untuk nilai komposisi *permeate* dipengaruhi oleh perubahan nilai *stage cut* yang berubah ubah dan pengaruh oleh komposisi *retentate*, komposisi *permeate* tertinggi berada pada nilai 0,980 mol. target yang ingin dicapai pada penilitan ini, menurut perhitungan yang telah dilakukan adalah mendapatkan nilai komposisi metana yang paling besar dan nilai komposisi karbondioksida yang paling kecil. Nilai yang

telah didapatkan untuk gas metana yaitu 0,980 mol dan untuk gas metana yaitu 0,079 mol.

4.3 Perhitungan area membran

Perhitungan area membran ini adalah untuk mengetahui desain berupa area membran, menggunakan persamaan (3.6). Area membran adalah luasan dari modul fiber membran, umumnya menggunakan satuan m^2 . Area membran juga merupakan faktor penting dalam membuat sebuah model parameter untuk sistem membran *hollow fiber*, karena berpengaruh pada nilai komposisi kandungan metana dan karbondioksida. Semakin besar area membran maka akan semakin besar pula metana yang dihasilkan dan mengurangi karbondioksida dalam metana juga semakin besar. Hal ini telah dibuktikan dalam paper dan jurnal penelitian tentang pengaruh area membran dengan komposisi *permeate*. Seperti yang ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

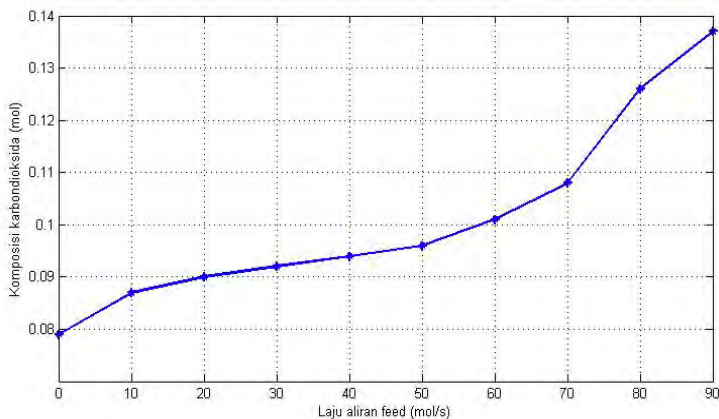
Tabel 4.3 Area Membran

Am (area membran) cm ²	Am (area membran) m ²
35.89	0.04
100.58	0.10
173.51	0.17
260.99	0.26
420.43	0.42
653.30	0.65
942.34	0.94
1241.59	1.24
1861.51	1.86
2022.74	2.02

Perhitungan ini diasumsikan tidak mengetahui nilai area membran sebelumnya, dengan menghitung terlebih dahulu nilai dari komposisi *permeate* dan juga *stage cut*. *Stage cut* yaitu perbandingan antara laju aliran *permeate* dengan laju aliran *feed*.

Pada hasil area membran ini diklasifikasikan mencari nilai area membran yang paling kecil. Area membran yang kecil fungsinya agar didapatkan optimasi dan efesiensi dalam penggunaan sistem membran *hollow fiber* pada industri. Diketahui pada tabel 4.3 diatas untuk ukuran area membran mempunyai nilai terkecil sebesar $35,89 \text{ cm}^2$ atau $0,04 \text{ m}^2$ dan nilai terbesar yaitu $2022,74 \text{ cm}^2$ atau $2,02 \text{ m}^2$. Untuk kondisi area membran dengan ukuran yang besar dapat diperoleh hasil

4.4 Hubungan laju aliran *feed* dengan komposisi karbondioksida

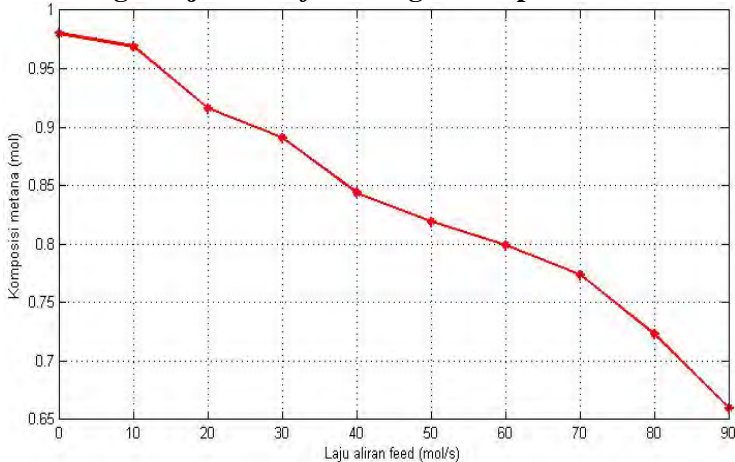


Gambar 4.1 Hubungan Antara Laju Aliran *Feed* Dengan Komposisi Karbondioksida

Hubungan komposisi karbondioksida ini dibandingkan dengan laju aliran *feed*. Dimana laju aliran *feed* mempunyai nilai yang besar dikarenakan pengaruh dari tekanan *feed* ketika masuk kedalam membran *hollow fiber* dan pada saat laju aliran *feed* itu mengalami kenaikan, maka komposisi karbondoksida yang laju alirannya diteruskan ke sisi *retentate* akan mengalami kenaikan pada nilai komposisinya, namun hal ini tidak akan mempengaruhi komposisi dari metana. Komposisi metana cenderung mengalami penurunan nilai dikarenakan tekanan dari *feed* membran besar, dan tekanan pada sisi *permeate* kecil. Sehingga laju aliran pada

sisi *permeate* akan mengalami penurunan dan ini berpengaruh pada komposisinya. Pada grafik dibawah ini nilai laju aliran *permeate* semakin menurun mengikuti nilai laju aliran *feed*.

4.5 Hubungan laju aliran *feed* dengan komposisi metana

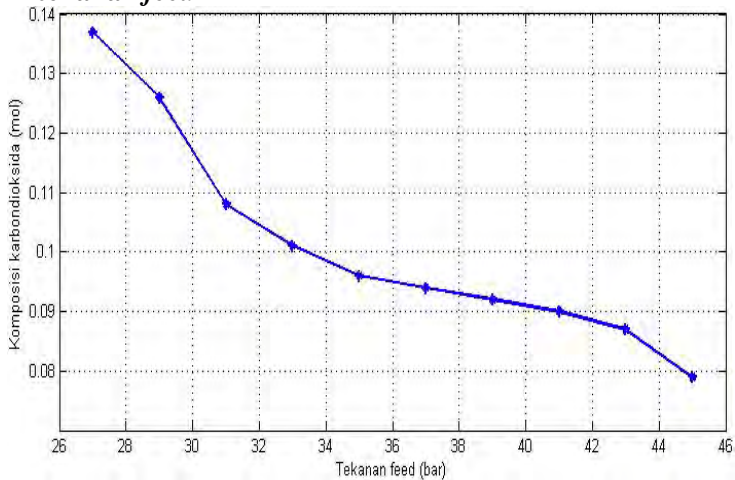


Gambar 4.2 Hubungan Antara Laju Aliran *Feed* Dengan Komposisi Metana

Hubungan laju aliran *feed* dengan komposisi metana ini nilainya turun jika dibandingkan dengan nilai komposisi karbondioksida, ketika nilai laju aliran *feed* juga semakin bertambah. Hal ini disebabkan oleh sistem membran itu sendiri, *permeate* adalah sisi dimana metana terpisah dengan karbondioksida melalui proses difusi pada membran. Tekanan *feed* lebih besar daripada tekanan pada sisi *permeate*, sehingga gas karbondioksida akan diteruskan dengan cepat, daripada gas metana yang akan naik dan melewati membran, karena jenis massa dari metana lebih kecil dibandingkan dengan karbondioksida. Pada tabel periodik kimia, massa jenis metana sebesar 16 dan sedangkan massa jenis dari karbondioksida sebesar 44. Nilai komposisi metana yang ditunjukkan gambar 4.2, perubahan komposisi metana menurun dari nilai yang paling

tinggi sebesar 0,980 mol ke angka 0,660 mol dan terus menurun ke angka yang paling kecil untuk komposisi metana sebesar 0,660 mol.

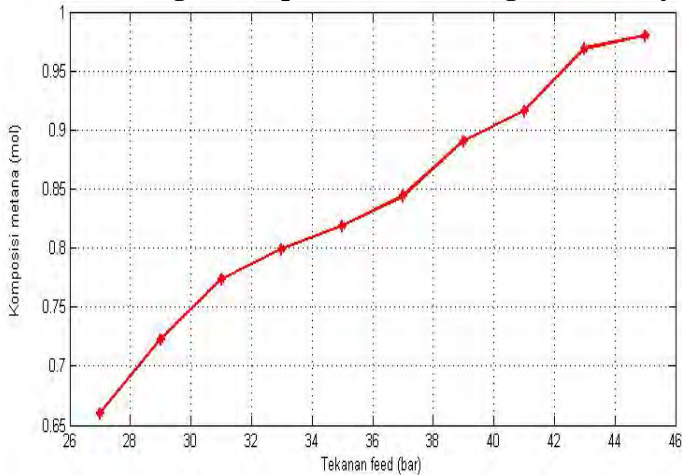
4.6 Perbandingan komposisi *karbondioksida* dengan tekanan *feed*



Gambar 4.3 Perbandingan Nilai Komposisi Karbondioksida Dengan Tekanan *Feed*

Pada grafik 4.4 m enunjukkan hubungan antara komposisi karbondioksida dengan tekanan *feed*. Dimana terjadi penurunan komposisi karbondioksida pada tekanan *feed* sekitar 27 bar, nilai komposisi karbondioksida mempunyai nilai sebesar 0,137 mol, dan menurun ke angka 0,126 mol pada tekanan *feed* sekitar 29 bar dan akan terus menurun sampai ke nilai yang paling kecil yaitu sebesar 0,739 mol pada tekanan *feed* sekitar 45 bar. Maka dapat dianalisa dan dapat disimpulkan yaitu semakin besar tekanan *feed* maka komposisi karbondioksida juga semakin turun, hal ini dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti : a rea membran, ketebalan fiber dan panjang fiber. Dengan begitu sebuah parameter desain sangatlah diperlukan dalam mencari sebuah nilai komposisi gas yang akan dipisahkan oleh sistem membran.

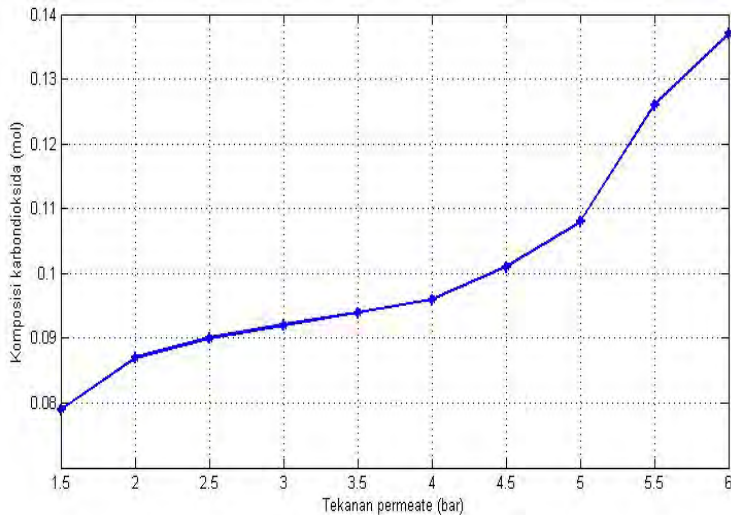
4.7 Perbandingan komposisi metana dengan tekanan *feed*



Gambar 4.4 Perbandingan Nilai Komposisi Metana Dengan Tekanan *Feed*

Pada grafik 4.5 m enunjukkan kenaikan tekanan *feed* mempengaruhi nilai komposisi metana. Nilai komposisi metana berbanding terbalik dengan nilai komposisi karbondioksida, seperti yang ditunjukkan pada grafik 4.4. komposisi metana mengalami perubahan yaitu dengan kenaikan yang semakin bertahap, awalnya nilai komposisi metana sebesar 0,660 mol pada tekanan feed sekitar 27 bar dan terus meningkat ke nilai komposisi sebesar 0,723 mol pada kondisi tekanan *feed* sekitar 29 bar. Komposisi metana mengalami kenaikan yang signifikan dengan nilai komposisi terbesar yaitu sebesar 0,980 mol pada kondisi tekanan *feed* sekitar 45 bar, perubahan nilai komposisi metana disebabkan oleh tekanan dari *feed* yang kondisinya berubah ubah sesuai dengan parameter input yang diinginkan. Semakin tinggi tekanan *feed* maka semakin kecil nilai karbondioksida pada metana, dan semakin besar pula nilai komposisi metana.

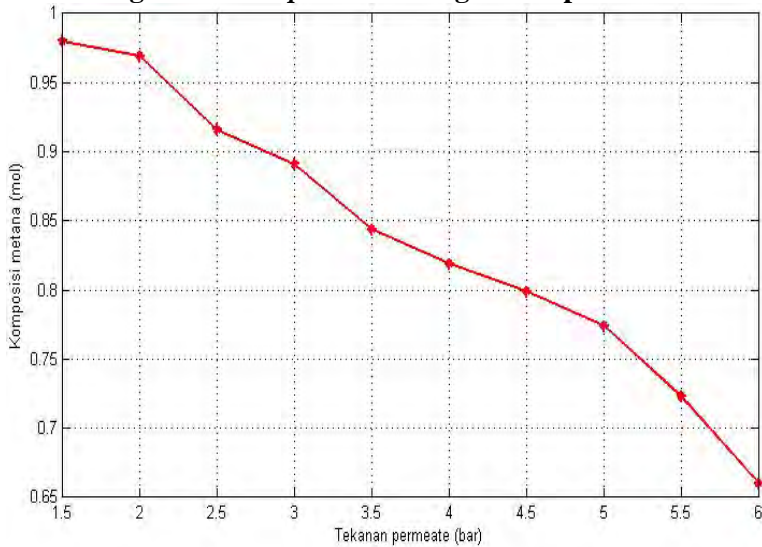
4.8 Hubungan tekanan *permeate* dengan komposisi karbondioksida



Gambar 4.5 Hubungan Tekanan Pada Sisi *Permeate* Dengan Komposisi Karbondioksida

Pada grafik 4.6 menunjukkan hubungan tekanan pada sisi *permeate* dengan komposisi karbondioksida. Dengan kenaikan nilai tekanan pada sisi *permeate*, nilai komposisi karbondioksida cenderung tidak stabil perubahannya dan nilainya naik seiring dengan besarnya tekanan pada sisi *permeate*. Tekanan pada sisi *permeate* adalah parameter kunci untuk membuat desain unit membran^[3]. Hasil dari penelitian ini menunjukkan tekanan pada sisi *permeate* memiliki pengaruh yang besar pada nilai karbondioksida. Nilai tekanan *permeate* naik dari 1,5 bar ke nilai terbesar yaitu 6 bar, hal ini berpengaruh pada nilai karbondioksida yang semakin bertambah. Nilai komposisi karbondioksida yang awalnya 0,079 mol naik menjadi 0,087 mol pada kondisi tekanan *permeate* sebesar 2 bar. Komposisi karbondioksida terus naik ke nilai yang paling besar yaitu 0,137 mol pada kondisi tekanan pada sisi *permeate* sebesar 6 bar.

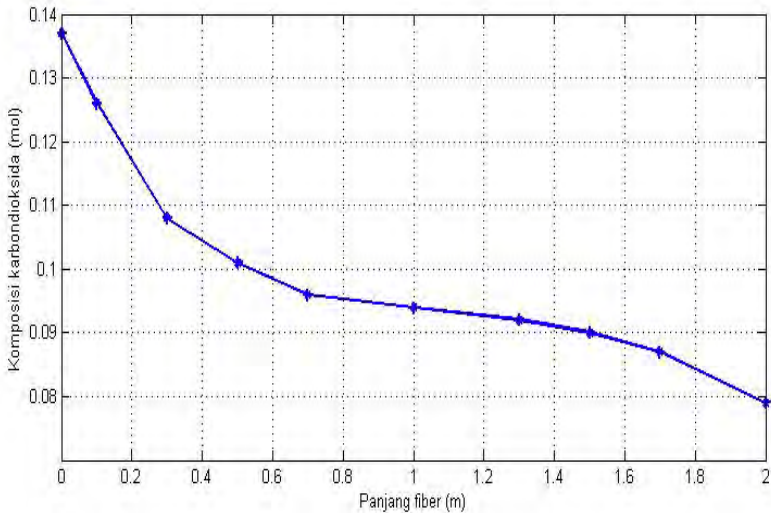
4.9 Hubungan tekanan *permeate* dengan komposisi metana



Gambar 4.6 Hubungan Tekanan Pada Sisi *Permeate* Dengan Komposisi Metana

Pada grafik 4.7 membandingkan tekanan pada sisi *permeate* dengan komposisi metana. Dapat dilihat bahwa nilai komposisi metana turun seiring dengan kenaikan tekanan pada sisi *permeate*, karena pada sisi *permeate* nilai metana cenderung mengalami penurunan jika dibandingkan dengan grafik 4.6, hubungan tekanan pada sisi *permeate* dengan komposisi karbondioksida. Nilai tersebut berbeda, komposisi karbondioksida naik pada kondisi tekanan *permeate* sebesar 4,5 bar, dengan nilai karbondioksida sebesar 0,101 mol. Sedangkan untuk nilai metana akan turun seiring dengan kenaikan tekanan pada sisi *permeate*, untuk nilai komposisi terbesar yaitu 0,980 mol pada tekanan *permeate* sebesar 1,5 bar. Nilai komposisi ini turun menjadi 0,969 mol pada kondisi tekanan pada sisi *permeate* sebesar 2 bar. Nilai komposisi metana terkecil yaitu 0,660 mol pada kondisi tekanan *permeate* sebesar 6 bar.

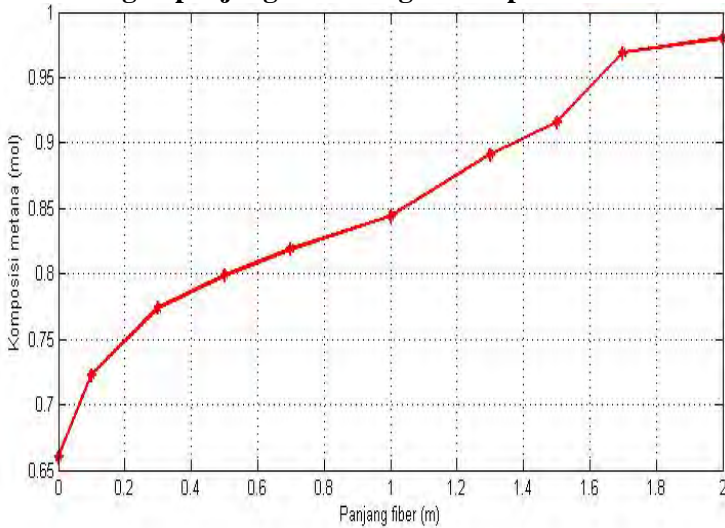
4.10 Hubungan panjang fiber dengan komposisi karbondioksida



Gambar 4.7 Hubungan Panjang Fiber Pada Modul Dengan Komposisi Karbondioksida

Hubungan panjang fiber ini berpengaruh pada komposisi karbondioksida dan metana, dimana pada grafik dibawah ini menunjukkan bahwa semakin panjang fiber yang digunakan maka akan semakin kecil pula komposisi karbondioksida. Nilai karbondioksida sebesar 0,137 mol turun menjadi 0,126 mol dengan panjang fiber sebesar 0,1m dan nilai ini akan terus turun menjadi 0,079 mol dengan panjang fiber 2m. panjang fiber tidak berpengaruh pada jumlah fiber, karena jumlah fiber disini diasumsikan tetap dan tidak berubah. Maka dengan ini dapat disimpulkan bahwa panjang fiber pada modul membran juga ikut berpengaruh pada besarnya nilai komposisi karbondioksida.

4.11 Hubungan panjang fiber dengan komposisi metana



Gambar 4.8 Hubungan Panjang Fiber Dengan Komposisi Metana

Pada grafik 4.8 berbanding terbalik dengan grafik 4.9. Dimana komposisi metana semakin naik mengikuti nilai panjang fiber yang digunakan semakin besar. Hal ini dikarenakan tekanan dan laju aliran nilai komposisi metana yang awalnya 0,660 mol menjadi 0,980 mol pada panjang fiber 2 m. Nilai maksimal metana berada pada panjang fiber sebesar 2 m dengan komposisi metana sebesar 0,980 mol. Panjang fiber hanya berpengaruh pada komposisi metana yang melewati membran dan karbondioksida yang diteruskan tanpa melewati membran, dengan menaikkan nilai panjang fiber tidak ada kaitannya dengan jumlah fiber, karena nilai fiber konstan^[3].

Setelah dilakukan perhitungan nilai *pressure drop*, persamaan differensial jenis aliran *counter current* untuk dua sistem komponen, *stage cut*, komposisi karbondioksida, komposisi metana dan area membran. Dengan memasukkan parameter tekanan *feed*, komposisi *feed*, tempertur, laju aliran

permeate, laju aliran *retentate*, *stage cut*, nilai gas konstan, panjang fiber, tekanan *permeate*, viskositas, gamma, alfa, permeabilitas metana dan karbondioksida. Maka di simulasikan pada *software* matlab dan microsoft excel. Kemudian dapat dianalisa grafik perbandingan untuk mencari parameter desain yang tepat untuk performansi membran *hollow fiber*. Didapatkan beberapa parameter yang telah dianalisa.

Tabel 4.4 Parameter Desain Membran *Hollow Fiber*

Parameter	Value	Unit
T (temperatur)	308	K
P_f (tekanan <i>feed</i>)	55	bar
P_p (tekanan <i>permeate</i>)	6	bar
P'_A (permeabilitas metana)	30	mol/(bar.s.m ²)
Komposisi metana	0,980	mol
Komposisi karbondioksida	0,079	mol
F_o (laju aliran <i>feed</i>)	100	mol/s
l_e (panjang fiber)	2	m
t (<i>thickness</i>)	95	μm
N_f (jumlah fiber)	300000	-
D_i (diameter dalam fiber)	200	μm
D_o (diameter luar fiber)	400	μm
A_m (area membran)	0,032	m ²
V (laju aliran <i>permeate</i>)	14,1	mol/s
L (laju aliran <i>retentate</i>)	90,25	mol/s

4.12 Optimasi desain untuk kondisi dan komposisi yang berbeda

Pada tahapan ini, mencari nilai area membran yang paling optimal dengan mempertimbangkan beberapa parameter *input*. Nilai area membran dihitung menggunakan GUI pada *software matlab* untuk aplikasi optimasi. Membuat beberapa *case* untuk kondisi operasi membran, sifat karakteristik membran dan kondisi desain. Pada optimasi ini dicari nilai area membran yang ukurannya kecil, sedang dan besar. Namun pada studi ini

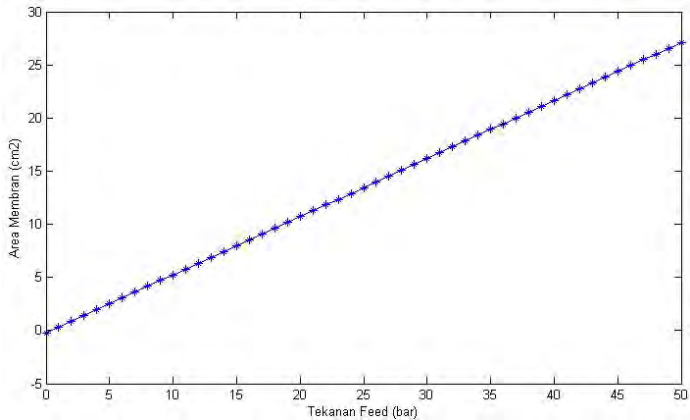
diasumsikan mencari nilai area membran yang kecil, karena area membran juga ikut mempengaruhi dari segi efisiensi membran itu sendiri. Optimasi ini menggunakan beberapa sampel *case* untuk mencari nilai area membran yang paling kecil. Pada gambar 3.3 adalah tampilan GUI pada *software* matlab untuk mencari nilai area membran. Didapatkan nilai terkecil sebesar $1,42 \text{ cm}^2$ atau sekitar $0,014 \text{ m}^2$. *Input* tekanan *feed* sebesar 3 bar, yang telah diambil dari beberapa sampel *case* yang disimulasikan. Nilai ini diasumsikan masih belum sesuai karena nilai dari area membran sangat kecil. Dibutuhkan beberapa sampel *case* dari simulasi pada GUI, agar dapat ditemukan nilai area membran yang paling sesuai. Perubahan tekanan *feed* mempengaruhi nilai dari area membran, optimasi ini mencari nilai dari area membran dengan menggunakan tekanan *feed* sebagai *input* utama yang diubah-ubah parameternya.

Tabel 4.5 Hasil Area Membran dengan Optimasi Simulasi
GUI

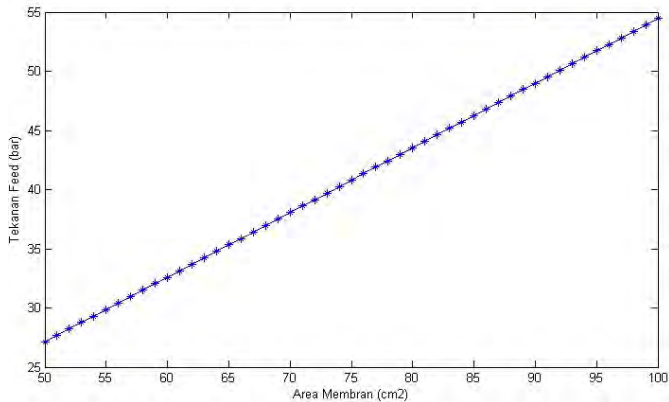
Tekanan <i>Feed</i> (bar)	Area Membran (cm^2)
10	5,24
20	10,71
30	16,18
40	21,65
50	27,12
60	32,59
70	38,05
80	43,52
90	48,99
100	54,46

Pada simulasi ini menggunakan range input tekanan *feed* dari 0-100 bar. Namun pada sampel *case* yang digunakan ini menggunakan *input* parameter dari 10-100 bar, hasil yang didapat yaitu untuk area membran yang paling ideal adalah pada angka $32,59 \text{ cm}^2$ dengan *input* parameter tekanan *feed* sebesar 60

bar. Optimasi ini juga menampilkan grafik sebagai hubungan antara tekanan *feed* dengan area membran.



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Tekanan *Feed* (0-50 bar) Dengan Area Membran



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Tekanan *Feed* (50-100 bar) Dengan Area Membran

Hasil yang ditunjukkan pada gambar (4.9) dan (4.10), tekanan *feed* yang nilainya bertambah menghasilkan area membran yang juga semakin besar. Maka dapat disimpulkan bahwa tekanan *feed* juga berpengaruh pada besar kecilnya area membran.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari analisa yang dilakukan dengan menggunakan metode pemodelan matematis, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan data sekunder dan perhitungan dapat diketahui bahwa nilai karbondioksida terkecil yaitu 0,079 mol dan untuk nilai terbesar yaitu 0,137 mol. Nilai metana terkecil yaitu 0.660 mol dan untuk nilai metana terbesar yaitu 0,980 mol.
2. Laju aliran *feed* berpengaruh pada naiknya nilai komposisi karbondioksida dan turunnya nilai komposisi metana.
3. Tekanan *feed* berpengaruh pada turunnya nilai komposisi karbondioksida dan naiknya nilai komposisi metana.
4. Panjang fiber juga berpengaruh pada nilai metana dan karbondioksida, dimana semakin panjang fiber maka akan semakin besar pula metana yang dapat dihasilkan, kenyataannya berbanding terbalik dengan nilai karbondioksida yang semakin turun ketika panjang fiber semakin bertambah, nilai terpanjang fiber sebesar 2 m dan terpendek sebesar 0,1 m (10 cm).
5. Nilai area membran berpengaruh pada besarnya nilai komposisi metana dan karbondioksida. Setelah dilakukan optimasi untuk kondisi beberapa *case*, diketahui bahwa nilai area membran terkecil yaitu 5,24 cm² atau 0,005 m² pada kondisi tekanan *feed* sebesar 10 bar. Untuk nilai area membran terbesar yaitu 54,46 cm² atau 0,054 m². Optimasi ini bertujuan untuk mencari area membran yang paling kecil, karena besar dan kecilnya area membran juga mempengaruhi faktor efisiensinya.
6. Nilai area membran setelah dilakukan simulasi optimasi pada *GUI matlab* yang ideal yaitu sebesar 32,59 cm² atau 0,032 m² pada kondisi tekanan *feed* sebesar 60 bar. Nilai

tekanan *feed* mempengaruhi besarnya nilai area membran, semakin besar tekanan *feed* maka area membran juga besar.

7. Dari hasil analisa, dapat diketahui bahwa *stage cut* juga berpengaruh pada komposisi metana dan karbondioksida di *retentate*. Kenaikan nilai *stage cut* mengakibatkan nilai metana turun dan sebaliknya, nilai karbondioksida naik ketika nilai *stage cut* bertambah naik.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat disampaikan yaitu perlu dikembangkan lagi analisa performansi membran dengan menggunakan jenis aliran yang berbeda, sistem membran yang berbeda dan juga jenis membran yang digunakan, karena permeabilitas suatu bahan atau sifat karakterisitk membran juga berpengaruh pada komposisi metana yang dihasilkan dan dapat mengurangi komposisi karbondioksida.

LAMPIRAN A

Coding perhitungan pada MATLAB

```
%Perhitungan nilai z'%  
clear all; clc  
Z=linspace(0.10,1.00,10);  
le=1;  
Zaksen=Z'/le; %z=koordinat difusi (m),%le=panjang modul  
fiber (m)  
%perhitungan nilai L'%  
L=[8.59  
17.37  
26.31  
35.39  
44.56  
53.79  
62.07  
71.38  
80.71  
90.05];  
Fo=50;  
Laksen=L'/Fo; %L=laju aliran retentate (mol/s),%Fo=laju aliran  
feed (mol/s)  
%Perhitungan nilai V'%  
V=[1.41  
2.63  
3.69
```

4.61

5.44

6.21

7.93

8.62

9.29

9.95];

Vaksen=V/Fo; %V=laju aliran permeate (mol/s)

%Perhitungan nilai gamma%

Pp=linspace(1.5,6,10);

Pf=linspace(27,45,10);

gam=Pp'./Pf'; %Pp=tekanan permeate (bar), %Pf=tekanan feed (bar)

%Perhitungan nilai alfa i%

Qi=3.21*10^-13;

Qn=1.33*10^-14;

alf=Qn/Qi; %Qi=Qco2 (mol/Pa.s.m2), %Qn=Qch4 (mol/Pa.s.m2)

%Perhitungan nilai Q%

T=308;

Rg=8.31*10^3;

Q=T*V*Rg./Pp';

%Perhitungan differensial pressure drop%

miu=9.5;

Nf=3*10^6;

phi=1.79*10^12;


```

Di=0.0003
dPp=-(128*miu*Q/Nf*phi*Di^4);
%Perhitungan differensial x retentate%
K1x=-1,22*10^22;
x=0.833;
y=0.148;
m=1-Vaksen;
n=K1x*alf*(1-x)*(x-gam*y)-x*(1-x)-gam*(1-y).*Zaksen;
dx=m./n;
%Perhitungan differensial y permeate%
K1y=-1.46*10^20;
dy=K1y*alf*(1-x)*(x-gam*y)-y*(1-x)-gam*(1-y).*Zaksen./(Vaksen);
%Perhitungan differensial V' & L'%
dVaksen=K1y*alf*(x-gam*y)+(1-x)-gam*(1-y).*Zaksen;
%Perhitungan differensial gamma%
K2y=5.34*10^-15;
dgam=-K2y*(Vaksen./gam).*Zaksen;
%Grafik Panjang fiber dengan komposisi CO2%
yp=[0.137
    0.126
    0.108
    0.101
    0.096
    0.094
    0.092

```

```
0.090
0.087
0.079];
l=[0
0.1
0.3
0.5
0.7
1
1.3
1.5
1.7
2];
```

figure (1)

```
plot(l,yp,'-*'); %yp=komposisi co2, l=panjang fiber
```

%Grafik panjang fiber dengan komposisi CH4%

```
xo=[0.660
0.723
0.774
0.799
0.819
0.844
0.891
0.916
0.969
0.980];
```

figure (2)

```
plot(l,xo,'-*'); %xo=komposisi ch4, l=panjang fiber
```

%Grafik feed pressure dengan komposisi co2%

figure(3)

```
plot(Pf,yp,'-*'); %Pf=tekanan feed, yp=komposisi co2
```

%Grafik feed pressure dengan komposisi CH4%

figure(4)

```
plot(Pf,xo,'-*');
```

%Grafik feed flowrate dengan komposisi co2%

Ff=[0

10

20

30

40

50

60

70

80

90];

yp1=[0.079

0.087

0.090

0.092

0.094

0.096

0.101

0.108

0.126

0.137];

figure(5)

plot(Ff,yp1,'-*'); %Ff=feed flowrate

%Grafik feed flowrate dengan komposisi ch4%

xo1=[0.980

0.969

0.916

0.891

0.844

0.819

0.799

0.774

0.723

0.660];

figure(6)

plot(Ff,xo1,'-*');

%Grafik permeate pressure dengan komposisi co2%

figure(7)

plot(Pp,yp1,'-*');

%Grafik permeate pressure dengan komposisi ch4%

figure(8)

plot(Pp,xo1,'-*');

%Grafik area membran dengan komposisi co2%

```

Am=[0.03
    0.100
    0.173
    0.260
    0.420
    0.653
    0.942
    1.241
    1.861
    2.022];
figure(9)
plot(Am,xo1,'-*');
%Grafik area membran dengan komposisi ch4%
figure (10)
plot(Am,yp1,'-*');
%Grafik area membran dengan tekanan permeate%
figure (11)
plot(Pp,Am,'-*');

```

Coding GUI optimasi membran pada MATLAB

```

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of
MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
Pfmin=str2num(get(handles.edit6,'string'));
Pfmax=str2num(get(handles.edit13,'string'));
i=Pfmin: Pfmax;
set(handles.listbox2,'string',(0.558)*((i*0.980)-(0.395)))

```

DAFTAR PUSTAKA

- [1] www.esdm.go.id diakses pada tanggal 30 mei 2014, pukul 21.45 WIB.
- [2] Dortmund, David. and Doshi, Kishore., "***Recent Developments in CO₂ Removal Membran Technology***", 1999.
- [3] Shamsabadi Arabi A, Kargari Ali, Farshadpour F, Laki Saeed. (2012). "**Mathematical Modeling of CO₂/CH₄ Separation by Hollow Fiber Membrane Module Using Finite Difference Method**". *Journal of Membrane and Separation Technology*, 2012, 1, 19-29.
- [4] C.J Geankopolis. (1993). "**Transport Processes and Unit Operations**", Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., U.S.A.
- [5] T. Pettersen, K.M. Lien, "Design studies of membran permeator proses for gas separation", *Gas. Sep. Purif*, Vol. 9, No. 3, pp. 151-169 1995.
- [6] Baker R.W., Lokhandwala K. "**Natural gas processing with membrans**" : an overview *Journal of Membran Technology and Research*, Inc. IE071083W 2008.
- [7] A.A. Al-Rabiah, K.D. Timmerhaus, and R.D. Noble. "**Membrane Technology for Hydrogen Separation in Ethylene Plants**". 6th World Congress of Chemical Engineering Melbourne, Australia 23-27 September 2001.
- [8] Rautenbach R. And Dahm W., "**Gas permeation-Module development and arrangement**", *Chem. Eng. Process.*, 1987, 21: 141.
- [9] Chotler P.D. "**Modifikasi Proses Pemisahan CO₂ Kadar Tinggi Dari Gas Alam**". Tesis program pascasarjana bidang ilmu teknik. Universitas Indonesia.